

法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

多連結気嚢型ソフトロボットによる蠕動運動の実現： 空気圧で制御可能なバルブの開発と身体の特性を 利用した制御

著者	作原 祐成
出版者	法政大学大学院理工学・工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	62
ページ	1-6
発行年	2021-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00023934

多連結気嚢型ソフトロボットによる蠕動運動の実現 -空気圧で制御可能なバルブの開発と身体の利用した 制御-

REALIZATION OF PERISTALTIC MOVEMENT BY MULTI-AIR SAC SOFT ROBOT
-DEVELOPMENT OF A SOFT AIR VALVE AND CONTROL USING THE DYNAMICS OF THE BODY-

作原祐成

Yusei SAKUHARA

指導教員 伊藤一之

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

In a conventional framework of intelligence, a brain is considered as the source of intelligence. However, lower animals can behave adaptively in the complex real world in spite of their simple brains. The dynamics of the body control their movement. In this study, we propose a crawling soft robot. The robot does not include sensors or controllers. The robot moves using the dynamics of the soft body instead of an electrical controller. We developed an actual robot and experiments were conducted to demonstrate effectiveness of cyclic expanding and shrinking motions. As a result, we confirmed that the crawling motion could be realized by simply injecting air at constant pressure.

Key Words : air valve, crawling, soft robot

1. はじめに

従来の枠組みでは、適応的な行動は脳によって実現されていると考えられている。多くの研究者たちがコンピュータを用いて、適応的な行動をするロボットの実現を目指している。しかし、ロボットの自律化には環境のモデル化や多くの自由度の制御に莫大な計算コストが必要であるため、実時間内の情報の処理が困難とされている。依然として、現実の世界で適応的に行動するロボットは実現出来ていない。

一方で、実世界に注目すると従来の枠組みでは説明できない事例が存在する。一般的に、生物は多くの自由度を持ち、複雑で知的な行動をする。しかし、一部の二等生物は脳を持たないにもかかわらず、複雑な現実の世界で適応的に行動することができる。この事実は、脳以外に適応的な行動を生み出すものがあることを意味する。

そこで、我々は身体の物理的な特性に着目した[1-6]。ほぼすべての二等生物は柔軟な体を持ち、この身体の柔軟性と環境の物理的な特性が相互に作用することによって適応的な行動を実現している。

本研究では、明示的なコントローラを持たないソフトロボットの開発を行う。提案するロボットは、柔軟な体の物理的な特性を利用して適応的な行動を生成する。この枠組みの例として、蠕動運動するソフトロボットを開発した。

提案するロボットは3つの気嚢で構成され、空気圧によって操作される。気嚢が順番に膨張および収縮することで波が生成され、ロボットは移動することが出来る。開発したロボットにおいて最も重要な点は、センサやコントローラが搭載されていないことである。提案手法の有効性を実証するために、実際のロボットを開発し、実験を行った。提案したロボットが一定の空気圧を加えるだけで周期的な動作を生成し、移動することを確認する。

2. 関連研究

(1) ソフトロボット

近年、様々なソフトロボットが開発されている[7-15]。ソフトロボットは、従来のロボットとは異なり柔らかい素材で構成された体を持つ。従来の剛体で構成されたロボットは決められたタスクを効率的に行うことが出来るが汎用性に制限がある。一方で、ソフトロボットは筋肉のような変形しやすい構造を持ち、従来のロボットでは実現できない動作をすることが出来る。ソフトロボットを開発する中での課題は、目的の動作を可能とするために形状や材料の性質を適切に設計する必要があることである。この柔軟な身体が計算の一部を負担することによって制御アルゴリズムを簡略化することが出来る。

(2) ミミズの蠕動運動

ソフトロボットに用いられる一般的な移動方法の一つが、図1に示すミミズの蠕動運動である。ミミズは体に複数の節を持つ。まず、頭部の体節を縮める。その収縮を後ろの体節に送り、同時に頭部の体節を伸張させる。体節を縮める事で地面との摩擦が大きくなり、縮んだ体節を中心に伸縮が行われる。この伸縮の繰り返す事によって縦波の進行波が起こりミミズは前進する。蠕動運動は、非常にシンプルなメカニズムでありながら安定した動きが可能である。

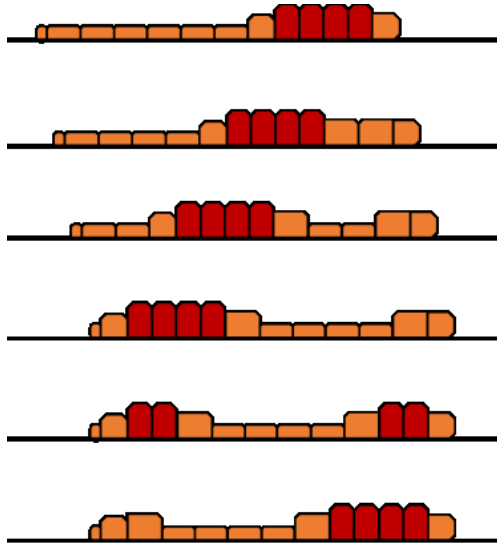


図1 ミミズの蠕動運動

(3) ミミズを模倣したソフトロボット

ミミズを模倣したソフトロボットは数多く開発されてきた[16-20]。

J. Z. Ge は2体節のミミズの動作を模倣したソフトロボットを開発した。両端にある空気圧アクチュエータを交互に地面に固定することで移動に必要な摩擦力を生成し、中央のアクチュエータが伸縮することで平面での移動を実現している。S. Seok は形状記憶合金製のコイルアクチュエータを用いたメッシュチューブ構造のソフトロボットを開発した。各節のコイルアクチュエータを収縮させることによって蠕動運動を生成している。

これらのロボットを含む従来研究の多くが、機体とそのコントローラが分かれている。一方で、特定の下等生物では体とコントローラが分かれておらず、身体の物理的な特性が下部生物の動きを制御している。

本研究では、コンピュータなどを用いずに、身体の物理的な特性を使用して蠕動運動するソフトロボットを開発する。

3. 提案手法と開発したロボット

本研究では、空気圧のみで駆動するソフトロボットの開発を目的とする。提案するロボットは、複数のバルブが組み合わせられた空気圧回路と3つの気嚢で構成される。こ

れらの物理特性によって、一定の空気圧を加えるだけで蠕動運動を生成し、ロボットを移動させる。提案するバルブと気嚢は柔軟な素材であるシリコンで作成する。

(1) 提案するロボット

図2にロボットの概要を示す。機体はシリコンで出来た3つの気嚢で構成され、提案するバルブを通して接続される。膨張する大きさを制限するために、シリコンには伸縮包帯を埋め込む。

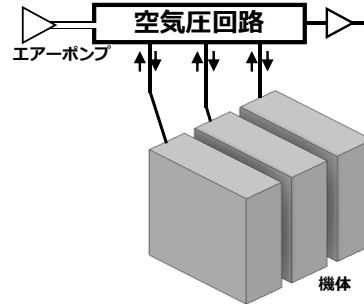


図2 ロボットの概要

(2) 空気で作開閉するバルブ

空気圧で作開閉するバルブを提案する。提案するバルブはシリコンで作成し、内部に空気圧を加えることで形状を変化させ開閉を切り替える。

図3に提案するバルブの内部構造を示す。バルブはフレームとプラグの2つで構成される。バルブが閉まっているときは、プラグがフレームに嵌っているため空気は流れない。切り替え用の気室に空気圧が加わると気室が膨らみ、接続されていたプラグが押し上げられてフレームとの間に隙間が出来て空気が流れるようになる。これによってバルブが開いた状態となる。

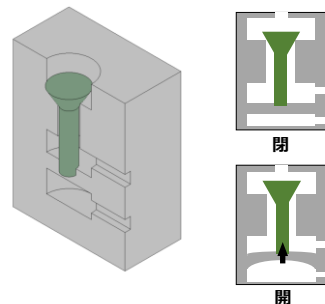


図3 バルブの内部構造

(3) 空気圧回路

図4にロボットに用いる空気圧回路を示す。この回路には、6つのバルブと3つの気嚢が含まれている。それぞれの気嚢には供給用と排出用のバルブが接続されている。また、各気嚢は2つのバルブの開閉を行う。気嚢Aは b_{in} と c_{out} 、気嚢Bは c_{in} と a_{out} 、気嚢Cは a_{in} と b_{out} を切り替える。一定の圧力で空気を注入するだけでバルブが自動的に切り替わり、時間の遅れとともに気嚢が膨張および収縮し、周期的な動作が生成される。

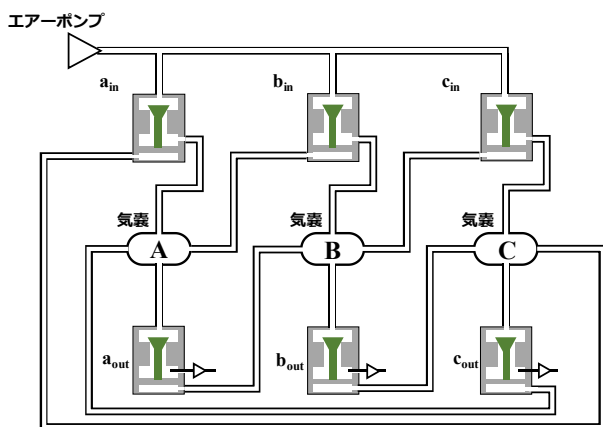


図 4 空気圧回路

図 5 に周期的動作のメカニズムを示す。図 5(a)の様に b_{in} が閉じて b_{out} が開いているとき、気嚢 B は収縮する。気嚢 B が収縮すると a_{out} が閉じるため、気嚢 A が膨張して図 5(b)の状態になる。図 5(b)では c_{out} が開いているため気嚢 C が収縮し、気嚢 B が膨張して図 5(c)の状態になる。図 5(c)では a_{out} が開いているため気嚢 A が収縮し、気嚢 C が膨張して図 5(a)の状態になる。

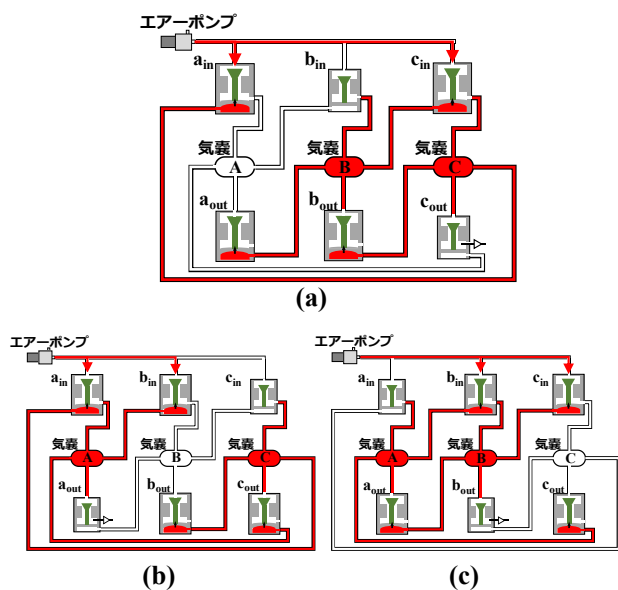


図 5 周期的動作のメカニズム

(4) ロボットの移動方法

次に、ロボットが移動する方法について述べる。本研究ではミミズの蠕動運動のように波を伝播させてロボットを移動させる。各気嚢は膨張と収縮を繰り返して図 6 に示すように移動する。

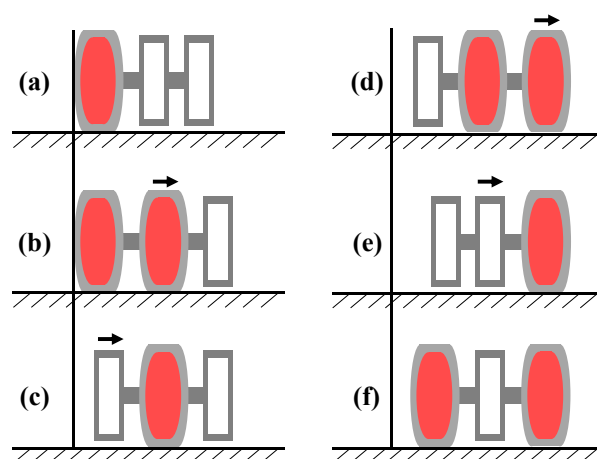


図 6 ロボットの移動方法

(5) 開発したバルブとロボット

開発したバルブを図 7 に、バルブ各部のパラメータを図 8 に示す。フレームはシリコンゴム 10A を用いて、プラグはシリコンゴム 60A を用いて作成した。応答時間の調整のために、バルブの周りに紐が結ばれている。作成した機体を図 9 に示す。機体は伸縮包帯を埋め込んだシリコン 10A を用いて作成した。



図 7 開発したバルブ

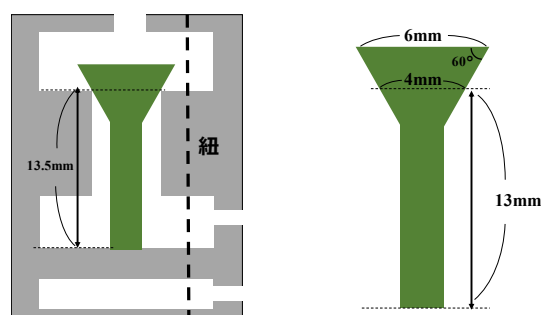


図 8 バルブ各部のパラメータ

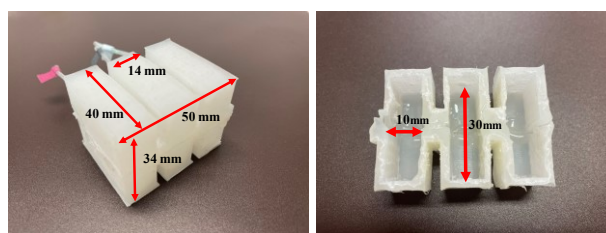


図 9 作成した機体

4. 実験

(1) バルブの応答特性

開発したバルブの応答特性を様々な条件で確認した。使用した空気圧回路を図 10 に、実際に作成した回路を図 11 に示す。今回の実験では 2 つの空気圧回路で実験をおこなった。1 つは切り替え部にポンプを直接接続した回路、もう 1 つは、ポンプとバルブの切り替え部に間に気嚢を接続した回路である。実験では、バルブの切り替え部の圧力 P_{in1} 、バルブの入り口の圧力 P_{in2} 、バルブの出力 P_{out} の 3 点で圧力を測定した。

図 12 に(a)直接接続した回路で P_{in2} の初期値が300 hPaのときの測定結果を示す。図から P_{in1} が立ち上がった後に P_{out} が立ち上がっていることが分かる。このときの応答速度は約 0.1 s であった。

次に(b)気嚢を接続した回路で P_{in2} の初期値が300 hPaとしたときの測定結果を図 13 に示す。このときの応答速度は約 0.4 s であった。これは気嚢が膨らむ事によって圧力 P_{in1} の上昇が緩やかになったからであると考えられる。

図 14 に(b)気嚢を接続した回路で P_{in2} の初期値が600 hPaのときの測定結果を示す。このときの応答速度は約 1.6 s であった。これは P_{in2} の値が高いためプラグ上部にかかる力が大きく、バルブを開くのに必要な圧力が高くなったためであると考えられる。

本研究では、この応答速度の遅れによって周期的な動作を生成する。

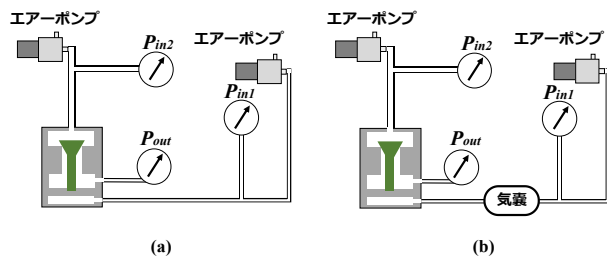


図 10 応答特性の測定(空気圧回路)

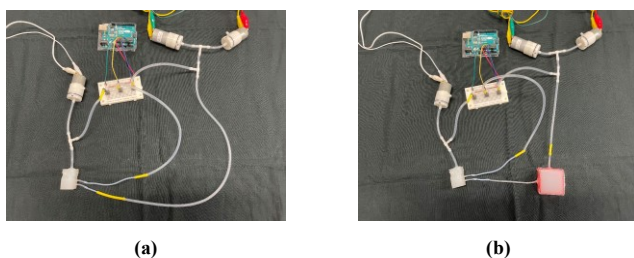


図 11 応答特性の測定(実験環境)

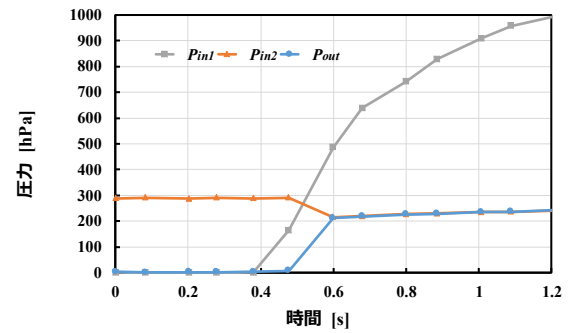


図 12 応答特性(回路 a 初期値 $P_{in2} = 300$ hPa)

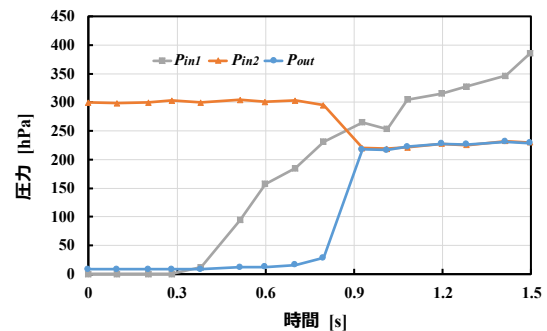


図 13 応答特性(回路 b 初期値 $P_{in2} = 300$ hPa)

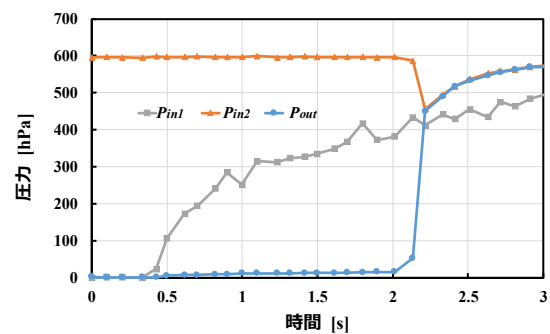


図 14 応答特性(回路 b 初期値 $P_{in2} = 600$ hPa)

(2) 周期的な動作の生成

図 4 の空気圧回路を作成し周期的動作が生成されることの確認を行った。実際に作成した回路を図 15 に示す。実験では各気嚢には圧力センサを取り付け、圧力の変化を測定した。

図 16 に気嚢の大きさを制限しなかったときの結果を、図 17 に気嚢の周囲にリボン巻いて大きさを制限したときの結果を示す。

両方の場合で、周期的な動作が生成されていることが確認できた。また、気嚢の大きさを制限することによって周波数が高くなることが確認できた。これは気嚢が膨らまないため、内部の圧力が上昇しやすかったためであると考えられる。

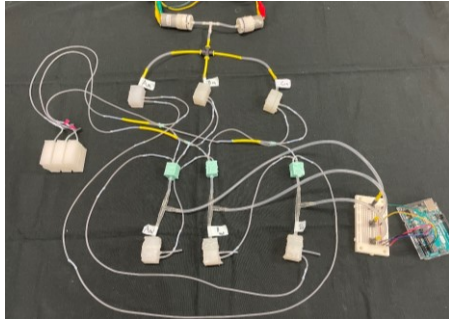


図 15 周期的な動作の生成(実験環境)

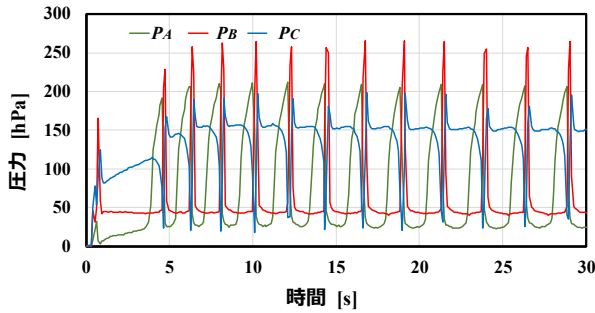


図 16 周期的な動作(制限なし)

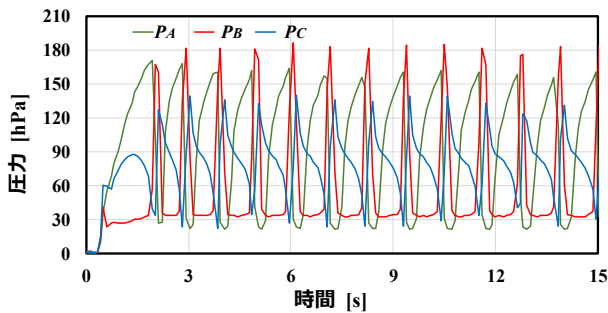


図 17 周期的な動作(制限あり)

(3) 歩容実験

図 18 に作成したロボットが移動の様子を示す。膨張と収縮の動きが次の気嚢に順番に伝播し、ロボットが前進することを確認した。機体とバルブの接続を入れ替えると、伝播の順番が逆になり、ロボットは逆方向に移動した。ロボットの移動速度は 120 秒で 5 cm の移動であった。

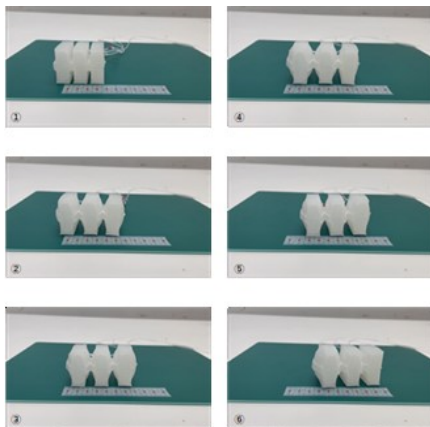


図 18 蠕動運動による機体の移動

5. 結論

本研究では、柔軟な身体の物理的な特性に焦点を当てた。空気圧で制御可能なバルブを提案し、提案したバルブを介して 3 つの気嚢を接続することにより、明示的なコントローラを持たないソフトロボットを開発した。提案したバルブが空気圧で制御可能である事を確認し、バルブと 3 つの気嚢で構成される空気圧回路が周期的な動作を生成することを確認した。一定の空気圧を加えると、身体の物理特性によって生成される蠕動運動によってロボットは移動した。

今後の課題としては、ロボット移動速度の向上やバルブの切り替え圧力の設定、バルブの小型化があげられる。また、本研究で提案したバルブと気嚢は同一の素材で構成されているため、気嚢と空気圧回路を一体化することで実用的なロボットが作成できると考えられる。

謝辞：最後に、本研究に際してご指導いただいた法政大学理工学部伊藤一之教授ならびに伊藤研究室の方々へ心から感謝いたします。今後の研究において、本論文が僅かにでも参考になればと願うものであります。

参考文献

- [1] K. Ito and S. Hagimori, "Flexible manipulator inspired by octopus: development of soft arms using sponge and experiment for grasping various objects," *Artificial Life and Robotics*, vol. 22, (3), pp. 283-288, 2017.
- [2] K. Ito and T. Mukai, "Flexible manipulator inspired by octopi: advantages of the pulling mechanism," *Artificial Life and Robotics*, vol. 25, (1), pp. 167-172, 2020.
- [3] K. Ito and H. Maruyama, "Semi-autonomous serially connected multi-crawler robot for search and rescue," *Advanced Robotics*, vol. 30, (7), pp. 489-503, 2016.
- [4] A. Saito et al, "Semi-Autonomous Multi-Legged Robot with Suckers to Climb a Wall," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 30, (1), pp. 24-32, 2018.
- [5] Y. Aso, K. Aihara and K. Ito, "Multi-legged robot for rough terrain: SHINAYAKA-L VI," *International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, pp.136-141, 2019.
- [6] K. Ito, Y. Homma and J. Rossiter, "The soft multi-legged robot inspired by octopus: climbing various columnar objects," *Advanced Robotics*, vol. 34, (17), pp. 1096-1109, 2020.
- [7] C. Majidi, "Soft Robotics: A Perspective - Current Trends and Prospects for the Future," *Soft Robotics*, vol. 1, (1), pp. 5-11, 2014.
- [8] D. Rus and M. T. Tolley, "Design, fabrication and control of soft robots," *Nature (London)*, vol. 521, (7553), pp. 467-475, 2015.
- [9] E. Brown et al, "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material," *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, vol. 107, (44), pp. 18809-18814, 2010.
- [10] R. F. Shepherd et al, "Multigait soft robot," *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, vol. 108, (51), pp. 20400-20403, 2011.

- [11] M. T. Tolley et al, "A Resilient, Untethered Soft Robot," *Soft Robotics*, vol. 1, (3), pp. 213-223, 2014.
- [12] A. D. Marchese, C. D. Onal and D. Rus, "Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators," *Soft Robotics*, vol. 1, (1), pp. 75-87, 2014.
- [13] E. W. Hawkes et al, "A soft robot that navigates its environment through growth," *Science Robotics*, vol. 2, (8), 2017.
- [14] G. Gu et al, "Soft wall-climbing robots," *Science Robotics*, vol. 3, (25), 2018.
- [15] A. Rafsanjani et al, "Kirigami skins make a simple soft actuator crawl," *Science Robotics*, vol. 3, (15), 2018.
- [16] T. Nakamura et al, "Development of a Peristaltic Crawling Robot Based on Earthworm Locomotion," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 18, (3), pp. 299-304, 2006.
- [17] A. Menciassi et al, "Development of a biomimetic miniature robotic crawler," *Autonomous Robots*, vol. 21, (2), pp. 155-163, 2006.
- [18] S. Seok et al, "Meshworm: A Peristaltic Soft Robot With Antagonistic Nickel Titanium Coil Actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, (5), pp. 1485-1497, 2013.
- [19] C. D. Onal, R. J. Wood and D. Rus, "An Origami-Inspired Approach to Worm Robots," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, (2), pp. 430-438, 2013.
- [20] J. Z. Ge, A. A. Calderon and N. O. Perez-Arancibia, "An earthworm-inspired soft crawling robot controlled by friction," *IEEE International Conference on Robotic and Biometrics*, 2017.